中部大学工学部紀要　50巻（2014）
ISSN：21877408

定電圧高速運転時における三相かご形誘導電動機のギャップ長に対する諸損失の実験的検討

Experimental Study of the Losses to Gap Length of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors with Constant-Voltage High-Speed Operation

五藤　誠士・ゴトウ　サトシ・Goto Satoshi／廣塚　功・ヒロツカ　イサオ・Hirotsuka Isao／中村　雅憲・ナカムラ　マサノリ・Nakamura Masanori／坪井　和男・ツボイ　カズオ・Tsuboi Kazuo／水野　孝行・ミズノ　タカユキ・Mizuno Takayuki

SUBJECT

Dynamometer,Gap length,High-speed constant-voltage operation,Induction motor

ABSTRACT

Recently, three-phase squirrel-cage induction motors (IMs) have been frequently used as variable-speed motors driven by an inverter system. However, the losses generally increase and the efficiency decreases when an IM is operated over a wide speed range.

In this paper, the losses for ten IMs, which are driven by either a sinusoidal wave source or PWM inverter, are measured by a method based on the dynamometer method defined by the Standard of the Japanese Electrotechnical Committee (JEC).

This paper discusses the experimental results concerning the losses to test motors having different gap lengths from experimental results.

定電圧高速運転時における三相かご形誘導電動機のギャップ長に対する諸損失の実験的検討

五藤　誠士 *，廣塚　功 **，中村　雅憲 **，坪井　和男 **
水野　孝行 ***

Experimental Study for the Losses to Gap Length of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors at Constant-Voltage High-Speed Operation

Satoshi GOTO *, Isao HIROTSUKA **, Masanori NAKAMURA **,
Kazuo TSUBOI **, and Takayuki MIZUNO ***

Recently, three-phase squirrel-cage induction motors (IMs) have been frequently used as variable-speed motors driven by an inverter system. However, the losses generally increase, and the efficiency decreases when an IM is operated over a wide speed range.

In this paper, the losses for ten IMs, which are driven by either a sinusoidal wave source or PWM inverter, are measured by a method based on the dynamometer method defined by the Standard of the Japanese Electrotechnical Committee (JEC).

This paper discusses the losses of test motors having different gap lengths from experimental results.

Keywords: Dynamometer, Gap length, High-speed constant-voltage operation, Induction motor

1.　まえがき

現代において，産業用機械における省エネルギー化は重要な課題となっており，三相かご形誘導電動機(以下，IM と略記)の高効率化，すなわち，低損失化が強く望まれている。IM の高効率化には，銅損，鉄損，機械損といった損失の低減はもちろんのこと，漂遊負荷損の正確な評価・低減が必要である。IM の損失に対して，損失を分類・考察した研究 [1]および漂遊負荷損に対しての詳細な検討 [2]も見られ，その基本的事項はかなり明確になってきている [3]。しかし，IM を可変速電動機として用いることが多くなっており，その損失の実態についてはいまだ不明瞭な点も多く，さらに詳細な検討が強く求められている。そこで，筆者らは正弦波およびインバータ(以下，INV と略記)駆動時における IM のギャップ長に対する諸特性に対する一連の検討を行っている [4),5]。

*電気電子工学専攻(Electrical and Electronic Engineering)
**電気システム工学科(Department of Electrical Engineering)
***明電舎(Meidensha Corporation)

Table 1. Specifications of test motors.

Abbreviation	IM_{4-25}	IM_{4-30}	IM_{4-35}	IM_{4-40}	IM_{4-45}	IM_{8-25}	IM_{8-30}	IM_{8-35}	IM_{8-40}	IM_{8-45}
Number of poles P	4					8				
Gap length g [mm]	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
Rated output/Rated frequency	1.00 kW/33.4 Hz (= fs), 0.50 kW/66.8 Hz (= $2fs$) 0.33 kW/100.2 Hz (= $3fs$), 0.29 kW/116.9 Hz (= $3.5fs$)					0.80 kW/66.8 Hz (= fs), 0.40 kW/133.6 Hz (= $2fs$) 0.27 kW/200.4 Hz (= $3fs$), 0.23 kW/233.8 Hz (= $3.5fs$)				
Rated voltage [V]	200									
Rated current [A]	5.0 at fs					5.9 at fs				
Based speed [min^{-1}]	920 at fs					945 at fs				

本論文では，これらの研究成果を取りまとめ，さらに整理・加筆し，ギャップ長の異なる 5 台の 4 極 IM および 5 台の 8 極 IM を，正弦波電源および INV で定電圧高速運転した場合における諸損失を動力計法に従って求め，検討した結果についてまとめている。その結果，電源，ギャップ長，駆動周波数および極数に対する諸損失の特徴などを実験的に明らかにしている。

2. 供試機の仕様および実験方法

表 1 に供試機の仕様を示す。同一内径の 4 極および 8 極の固定子に，ギャップ長が，標準ギャップ長 0.30mm に対して，-0.05～+0.15mm（0.05mm 毎）となるように表面を切削した 5 種類の回転子を組み込み，都合 10 台の試作 IM を用いた。（以下，例えば，4 極 IM のギャップ長 0.25mm を IM_{4-25}，同様に，8 極 IM のギャップ長 0.25mm を IM_{8-25} などと略記する。）定格出力は駆動周波数に反比例させて定めている。

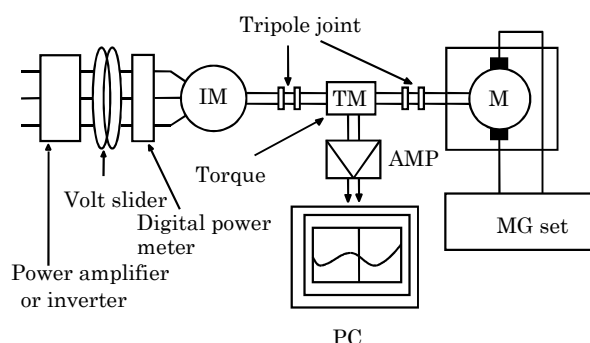



Fig. 1. Arrangement of experimental apparatus.

図 1 に実験装置の構成図を示す。電源には，正弦波駆動時では正弦波可変周波数電源装置，INV 駆動時ではキャリア周波数を変更できる定格容量 5.5kVA，オールデジタル制御，正弦波近似 PWM 方式の三相汎用電圧形 INV を用いている。本実験においては，キャリア周波数を 7kHz 一定としている。また，電源と供試機の間に，供試機への印加電圧を正確に調整するため，ボルトスライダーを接続している。なお，ボルトスライダーの入力側電圧波形と出力側電圧波形とが一致していることを確認している。デジタルパワーメータとして日置製 3331 を用い，電圧を平均値整流実効値換算値，電流を真の実効値として，2 電力計法で高調波を含めた全有効電力を測定している [6]。供試機を直流電気動力計に接続して，負荷を容易に変えられるようにしている。トルクは，トルクメータにより検出し，アンプ，A/D 変換ボードを介してパーソナルコンピュータで記録している。正弦波可変周波数電源および INV のいずれの電源で駆動した場合であっても，印加電圧は 200V 一定とした。ただし，駆動周波数は基底周波数時の同期速度を 1000min^{-1} として設計しているため，4 極 IM では 33.4Hz を基底周波数 (fs) とし，66.8Hz($2fs$)，100.2Hz($3fs$)および 116.9Hz($3.5fs$)，8 極 IM では，66.8Hz を基底周波数 (fs) とし，133.6Hz($2fs$)，200.4Hz($3fs$)および 233.8Hz($3.5fs$)とした。

本論文では，諸損失を JEC-2137 [7]の動力計法により求めている。本方法によれば，漂遊負荷損を(1)式のように，入力から出力および漂遊負荷損以外の各損失を差し引いた暫定値として求め，漂遊負荷損暫定値の回帰直線から算出した。

[漂遊負荷損] = [入力]－[出力]－[一次抵抗損]
－[二次抵抗損]－[鉄損]－[機械損]・・・・・・・(1)

出力はトルクを測定し，回転数から角速度を求め，トルクと角速度との積により算出している。鉄損は鉄心以外の金属部分において発生する損失を含むことになり，無負荷鉄損として算出されている。

3. 実験結果および検討

図 2 および図 3 に，横軸をギャップ長，縦軸を定格出力に対する諸損失の割合として，各極数，駆動周波数および駆動方法におけるギャップ長に対する諸損失を定格出力に対する割合で示す。また，表 2 に IM の定格負荷時の諸量を示す。

Table 2. Characteristics of rated load for IMs.

(a)Characteristics of driven at fs

Abbreviation	IM$_{4-25}$	IM$_{4-30}$	IM$_{4-35}$	IM$_{4-40}$	IM$_{4-45}$	IM$_{8-25}$	IM$_{8-30}$	IM$_{8-35}$	IM$_{8-40}$	IM$_{8-45}$
Primary current [A]	4.60	4.69	4.84	5.01	5.18	5.36	5.60	6.03	6.43	6.81
Exciting current [A]	2.44	2.61	2.98	3.23	3.48	4.33	4.58	5.29	5.80	6.35
Power factor [%]	83.2	81.2	79.4	77.9	76.6	5.81	55.9	54.0	52.4	51.9
Efficiency [%]	75.4	75.7	75.1	74.0	72.9	73.4	73.5	70.6	67.5	65.2

(b)Characteristics of driven at $2fs$

Abbreviation	IM$_{4-25}$	IM$_{4-30}$	IM$_{4-35}$	IM$_{4-40}$	IM$_{4-45}$	IM$_{8-25}$	IM$_{8-30}$	IM$_{8-35}$	IM$_{8-40}$	IM$_{8-45}$
Primary current [A]	2.13	2.17	2.24	2.30	2.35	2.54	2.67	2.90	3.04	3.23
Exciting current [A]	0.931	1.008	1.167	1.294	1.442	1.914	1.928	2.27	2.51	2.78
Power factor [%]	83.6	81.6	79.0	77.0	75.0	58.1	54.4	51.3	49.6	47.3
Efficiency [%]	81.0	81.6	81.6	81.5	81.9	78.2	79.6	78.4	76.7	75.5

(c)Characteristics of driven at $3fs$

Abbreviation	IM$_{4-25}$	IM$_{4-30}$	IM$_{4-35}$	IM$_{4-40}$	IM$_{4-45}$	IM$_{8-25}$	IM$_{8-30}$	IM$_{8-35}$	IM$_{8-40}$	IM$_{8-45}$
Primary current [A]	1.567	1.593	1.627	1.645	1.679	1.853	1.960	2.09	2.14	2.27
Exciting current [A]	0.651	0.700	0.802	0.878	0.977	1.232	1.317	1.537	1.686	1.869
Power factor [%]	84.2	81.2	79.2	77.5	76.2	58.9	55.4	52.1	50.9	48.9
Efficiency [%]	72.2	73.7	74.0	74.7	74.5	71.7	72.1	72.2	71.4	70.7

(d)Characteristics of driven at $3.5fs$

Abbreviation	IM$_{4-25}$	IM$_{4-30}$	IM$_{4-35}$	IM$_{4-40}$	IM$_{4-45}$	IM$_{8-25}$	IM$_{8-30}$	IM$_{8-35}$	IM$_{8-40}$	IM$_{8-45}$
Primary current [A]	1.515	1.511	1.529	1.549	1.580	1.709	1.819	1.893	1.937	2.03
Exciting current [A]	0.603	0.639	0.720	0.789	0.866	1.102	1.176	1.356	1.478	1.630
Power factor [%]	85.0	83.1	81.0	79.3	77.8	60.0	56.1	53.8	52.6	50.7
Efficiency [%]	65.0	66.7	67.6	68.2	68.1	64.6	65.4	65.1	65.0	64.7

正弦波駆動時の一次抵抗損 W_{c1S} は，いずれの駆動周波数および極数においてもギャップ長に対してほぼ比例して増大する傾向にある。これは，ギャップを広げると，表 2 に示したように，励磁電流が増大し，力率が低下するため，一次電流が増大したからである。INV 駆動時の一次抵抗損 W_{c1I} のギャップ長に対する傾向は，W_{c1S} のそれとほぼ同様である。しかし， W_{c1I} は W_{c1S} よりも大きい傾向にある。

正弦波駆動時の二次抵抗損 W_{c2S}，鉄損 W_{hS} および機械損 W_{mS} は，いずれの駆動周波数および極数においても，ギャップを広げてもほとんど変化しない。INV 駆動時の二次抵抗損 W_{c2I}，鉄損 W_{hI} および機械損 W_{mS} も， W_{c2S}， W_{hS} および W_{mS} と同様に，いずれの駆動周波数および極数においても，ギャップを広げてもほとんど変化しない。

漂遊負荷損 W_G は，一般に，ギャップを広げると，減少すると言われている [8)]が，8 極 IM を INV で駆動した場合，すなわち，図 2(e)，図 2(f)， 図 2(g)および 図 2(h)においてはギャップを広げると， W_G は増大するときもあり，今後，さらに詳細に検討したい。

8 極 IM の全損失は，図 2 においてギャップを広げると，いずれの駆動周波数，極数および駆動方法においても増大する。これは 4 極 IM の場合に比べ，一次電流の増大割合が大きいため，一次抵抗損 W_{c1} が大きくなったためであると考えられる。4 極 IM の場合，図 3 に示したように，ギャップを広げると， fs 駆動時において増大し，3 fs および 3.5 fs 駆動時において減少した。これは，fs 駆動時においては W_G の減少割合に対し，W_{c1} の増大割合が大きいためである。また，3 fs および 3.5 fs 駆動時においては，fs 駆動時とは逆に， W_{c1} の増大により W_G の減少割合が大きくなったためである。したがって，ギャップ長を変化させた場合，全損失は，主に W_{c1} の増大割合と W_G の減少割合に影響され変化する。

4. まとめ

本論文では，極数，ギャップ長，駆動方法および駆動周波数に対する IM の諸損失を動力計法に従って求め，比較・検討を行った。その結果，得られた主要な結論は以下の通りである。

本論文の供試機において，

（1）ギャップを広げると，極数や駆動方法，駆動周波数によらず，一次抵抗損は増大するが，二次抵抗損，鉄損，機械損はあまり変化しない。

（2）ギャップ長を変化させた場合，全損失は，主に一次抵抗損の増大割合と漂遊負荷損の減少割合に影響され変化する。特に，8 極 IM においては一次抵抗損の増大割合が大きく影響する。

今後，これらの実験結果をさらに詳細に検討する予定である。

参考文献

1) 例えば，P.L.Alger: "Induction Machines" ,Gordon and Breach Science Pub.(1970)

2) 誘導機専門委員会：「誘導機の漂遊負荷損」電気学会技術報告，58(1963-8)

3) 交流機の損失評価技術調査委員会：「誘導機と同期機の損失評価技術」電気学会技術報告，967(2004-8)

4) 例えば，川上訓弘・廣塚功・坪井和男・松浦秀実・水野考行：「三相かご形誘導電動機の定電圧高速運転時における諸損失の分析-8 極 IM に対するギャップ長の影響など-」回転研資 RM-08-127(2008-11)

5) For example, S. Goto, I. Hirotsuka, M. Nakamura, K. Tsuboi, T. Mizuno："Experimental Study of Losses During High-Speed Constant-Voltage Operation of Three-PhaseSquirrel-Cage Induction Motor" ICEMS2014, DS1H2-1(2014-10)

6) 日置電機株式会社　開発支援課：「HIOKI 3331 パワーハイテスタ　取扱説明書」日置電機株式会社 (2003-12)

7) 電気規格調査会：「JEC-2137-2000　誘導機」電気書院

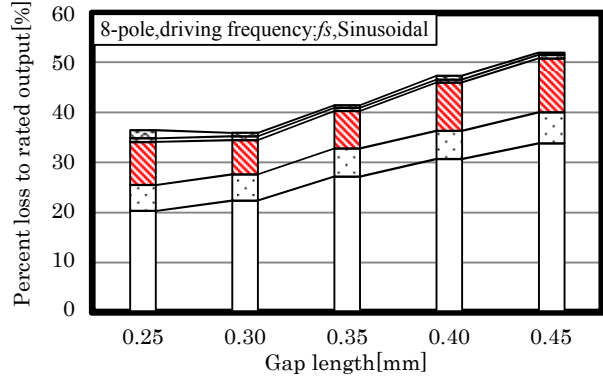
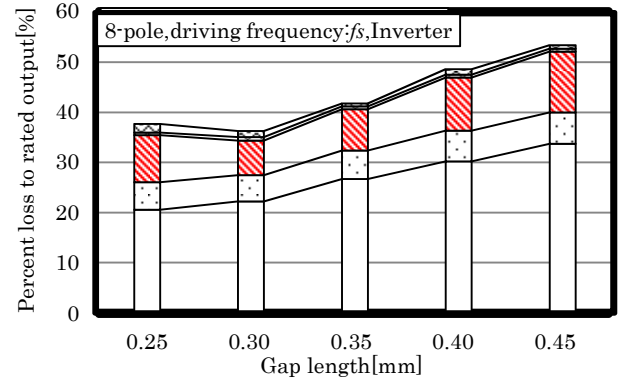
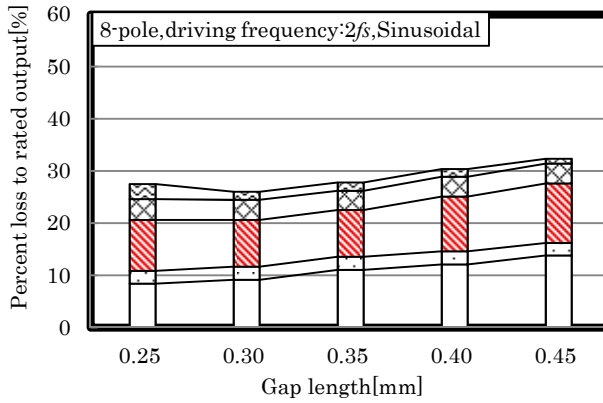
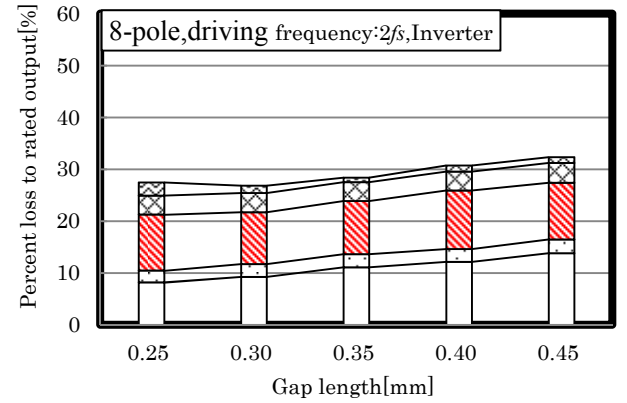
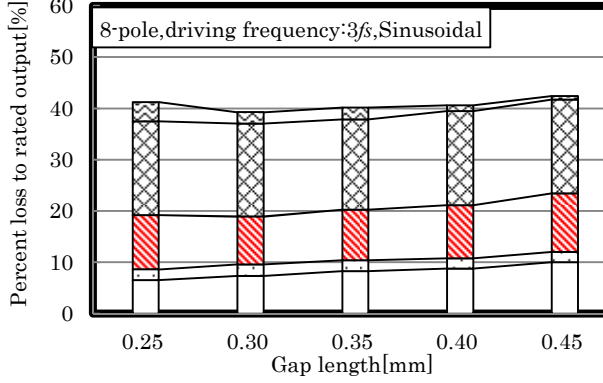
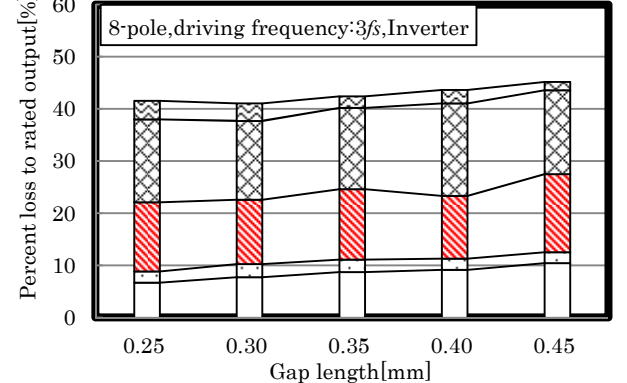
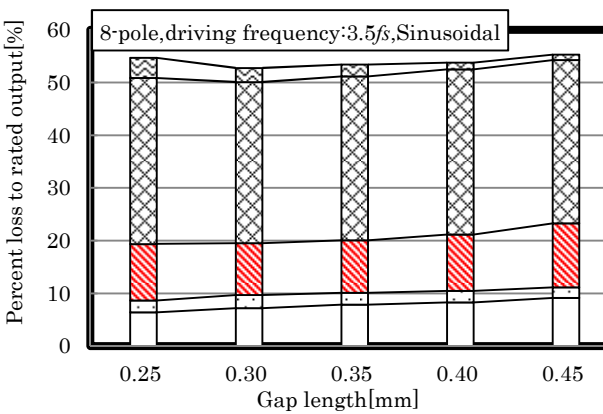
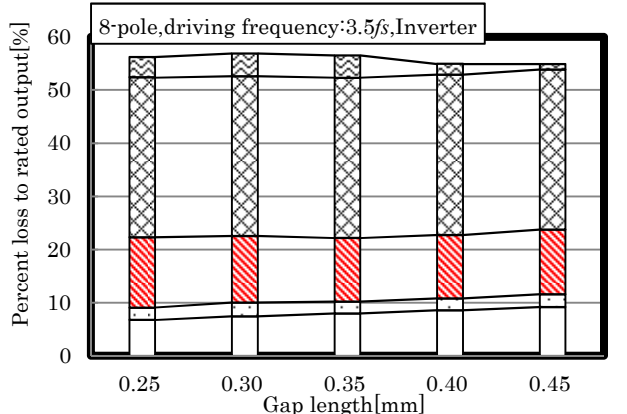
8) 藤野義一：「かご形誘導電動機の漂遊トルク」電気学会雑誌，81，878，p.1826 （1961-11）

(a) 8-pole,driving frequency:*fs*,Sinusoidal

(e) 8-pole,driving frequency:*fs*,Inverter

(b) 8-pole,driving frequency:2*fs*,Sinusoidal

(f) 8-pole,driving frequency:2*fs*,Inverter

(c) 8-pole,driving frequency:3*fs*,Sinusoidal

(g) 8-pole,driving frequency:3*fs*,Inverter

(d) 8-pole,driving frequency:3.5*fs*,Sinusoidal

(h) 8-pole,driving frequency:3.5*fs*,Inverter

Fig. 2. Percent loss to rated output for 8-pole IM at rated load.

(a) 4-pole,driving frequency:*fs*,Sinusoidal

(e) 4-pole,driving frequency:*fs*,Inverter

(b) 4-pole,driving frequency:2*fs*,Sinusoidal

(f) 4-pole,driving frequency:2*fs*,Inverter

(c) 4-pole,driving frequency:3*fs*,Sinusoidal

(g) 4-pole,driving frequency:3*fs*,Inverter

(d) 4-pole,driving frequency:3.5*fs*,Sinusoidal

(h) 4-pole,driving frequency:3.5*fs*,Inverter

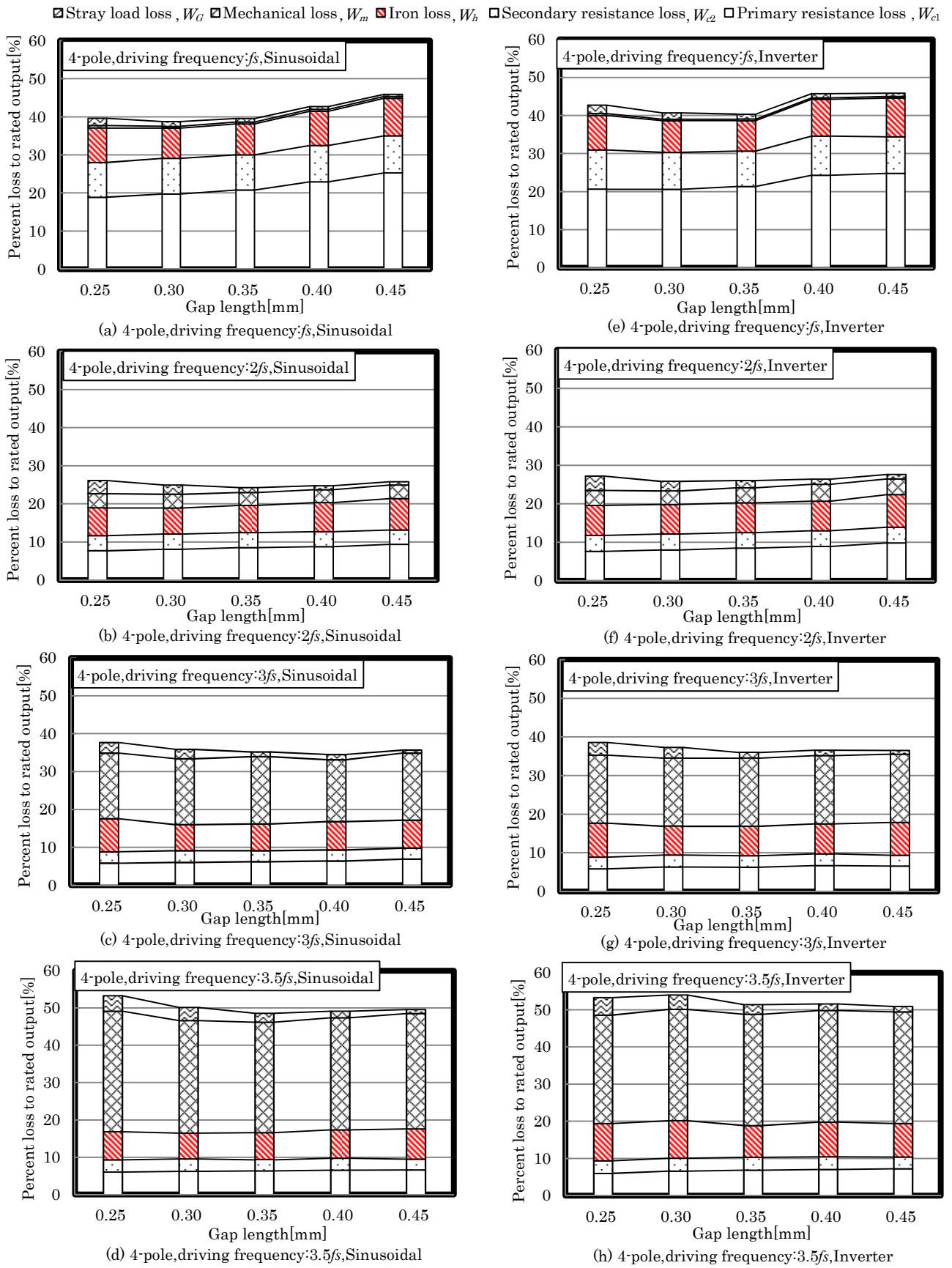



Fig. 3. Percent loss to rated output for 4-pole IM at rated load.